

УДК 621.372.542.97

НУЛЕВЫЕ ЦЕПИ, ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ ПО ЧАСТОТЕ ОДНИМ ЭЛЕМЕНТОМ

Э. Г. ЕМЕЛЬЯНОВ, Н. М. СТЕПАНЕНКО

(Представлена научно-техническим семинаром кафедры радиотехники)

Рассматриваются две нулевые цепи, являющиеся модификацией ТТ-RC моста. Показано, что по равномерности частотной характеристики, постоянству добротности и ряду других свойств ТТ-RC мост с разделенными цепями превосходит ТТ-RC мост с двумя входами.

Иллюстраций 2, библиографий 6.

При построении избирательных усилителей и генераторов широко применяются нулевые цепи, в том числе двойной Т-образный RC мост (ТТ-RC мост). Перестройка обычного ТТ-RC моста в широком диапазоне частот возможна изменением минимум двух элементов [1], однако ТТ-RC мост с двумя входами [2, 3, 4] и ТТ-RC мост с разделенными цепями [5, 6] позволяют осуществлять перестройку частоты одним элементом. Это обстоятельство может оказаться решающим при выборе перестраиваемой нулевой цепи для устройства, настройку которого необходимо осуществлять автоматически, так как исключает необходимость точного сопряжения элементов перестройки.

Рассмотрим подробнее основные свойства ТТ-RC моста с двумя входами и ТТ-RC моста с разделенными цепями.

Коэффициент передачи ТТ-RC моста с двумя входами описывается уравнением [3]

$$\dot{T} = \frac{m(n^2 - 1)}{n^2 - m - jn\sqrt{m} \cdot \frac{1}{q}}, \quad (1)$$

где m — коэффициент включения ВЧ-звена;
 q — добротность ТТ-RC моста при $m = 1$;
 n — относительная расстройка;

$$n = \frac{\omega}{\omega_0};$$

ω_0 — частота настройки.

$$q = \frac{\sqrt{C_1 C_2 R_3 (R_1 + R_2)}}{C_3 R_1 + C_2 (R_1 + R_2)};$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{m C_1 C_2 (R_1 + R_2) R_3} = \frac{C_1 + C_2}{n C_1 C_2 C_3 R_1 R_2}.$$

Если $\frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2) R_3} = \frac{C_1 + C_2}{C_3}$, то на частоте настройки ω_0 коэффициент передачи моста равен нулю, причем при неизменных элементах моста частоту ω_0 можно перестраивать изменением m , т. е. одним элементом.

Но, во-первых, перестройка ω_0 изменением m приводит к существенной асимметрии амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) моста. Из (1) имеем $\dot{T}(n=0) = 1$, $\dot{T}(n=\infty) = m$. Следовательно, уже при трехкратном изменении ω_0 нулевая цепь практически вырождается или в фильтр нижних частот (при увеличении ω_0), или в фильтр верхних частот (при уменьшении ω_0).

Во-вторых, если при $m = 1$ фазочастотная характеристика (ФЧХ) моста симметрична относительно ω_0 , то изменение m приводит к смещению ФЧХ, что видно из выражения для ФЧХ моста

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{n \sqrt{m}}{q(n^2 - m)}. \quad (2)$$

В-третьих, избирательность ТТ-RC моста с двумя входами максимальна при $m = 1$ и с изменением m резко уменьшается [3].

Следует отметить также высокую чувствительность коэффициента передачи этого моста к изменению параметров элементов, сложность общей настройки.

Перечисленные недостатки, особенно смещение ФЧХ относительно ω_0 при изменении m , затрудняют применение ТТ-RC моста с двумя

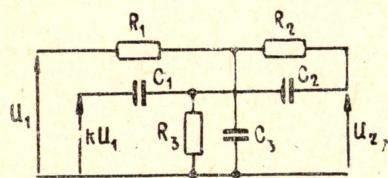


Рис. 1. Принципиальная схема ТТ-RC моста с двумя входами

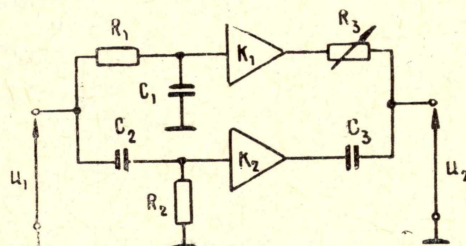


Рис. 2. Принципиальная схема ТТ-RC моста с разделенными цепями

входами в активных фильтрах, работающих с большим перекрытием по частоте.

Коэффициент передачи ТТ-RC моста с разделенными цепями описывается уравнением

$$\dot{T} = \frac{K_1(1 + j\omega\tau_2) - K_2\omega^2\tau_2\tau_3(1 + j\omega\tau_1)}{(1 + j\omega\tau_1)(1 + j\omega\tau_2)(1 + j\omega\tau_3)}, \quad (3)$$

где $\tau_1 = R_1 C_1$, $\tau_2 = R_2 C_2$, $\tau_3 = R_3 C_3$. K_1 и K_2 — коэффициенты передачи усилителей соответственно в НЧ и ВЧ трактах моста.

При выполнении условия

$$\tau_1 = \tau_2 \quad (4)$$

(3) перепишется в виде

$$\dot{T} = K_1 \frac{1 - \frac{K_2}{K_1} \omega^2 \tau_1 \tau_3}{1 - \omega^2 \tau_1 \tau_3 + j\omega(\tau_1 + \tau_3)}. \quad (5)$$

Из (5) следует, что на частоте

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K_1}{K_2 \tau_1 \tau_3}} \quad (6)$$

коэффициент передачи моста равен нулю.

Частоту настройки ω_0 можно перестраивать или изменением отношения K_1/K_2 , или сопряженным изменением постоянных времени τ_1 и τ_2 или изменением только постоянной времени τ_3 .

Наибольший интерес представляет возможность перестройки частоты ω_0 изменением τ_3 — постоянной времени цепи, составленной из резистора R_3 и конденсатора C_3 , т. е. изменением одного элемента (либо резистора R_3 , либо конденсатора C_3), не нарушая при этом условия получения нуля коэффициента передачи на частоте ω_0 .

Чтобы избежать нежелательных эффектов, свойственных цепям с двумя входами, необходимо обеспечить равенство коэффициентов передачи усилителей

$$K_1 = K_2. \quad (7)$$

При выполнении условия (7) выражение (5) можно записать в виде

$$T = \frac{K_1}{1 - j \frac{1}{qY}}, \quad (8)$$

где $Y = \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}$ — обобщенная расстройка;

ω_0 — частота настройки моста;

$$\omega_0 = \frac{1}{\tau_1 \sqrt{a}}; \quad (9)$$

a — параметр настройки;

q — добротность моста;

$$q = \frac{\sqrt{a}}{1 + a}; \quad (10)$$

$$a = \frac{\tau_3}{\tau_1}.$$

АЧХ и ФЧХ ТТ-РС моста с разделенными цепями описываются уравнениями:

$$|H| = \frac{K_1}{\sqrt{1 + \frac{1}{(qY)^2}}}; \quad (11)$$

$$\varphi = \arctg \frac{1}{qY}. \quad (12)$$

Из (11) и (12) следует, что при перестройке ТТ-РС моста изменением τ_3 в широкой полосе частот обеспечивается симметрия АЧХ и ФЧХ относительно ω_0 .

Добротность моста максимальна при $a = 1$ (т. е. $\tau_1 = \tau_3$) и равна $q_m = 0,5$. При $a \neq 1$ всегда $q < q_m$, однако добротность снижается значительно медленнее, чем у ТТ-РС моста с двумя входами. Изменение добротности внутри заданного диапазона будет минимальным, если на центральной частоте диапазона $\omega_{ц} = \sqrt{\omega_{\min} \cdot \omega_{\max}}$ выполняется условие $a = 1$. В этом случае добротность минимальна на границах диапазона и, например, при двухкратном перекрытии по частоте $q_{\min} = 0,47$.

Проще всего обеспечить выполнение условия (7), а также гарантировать высокую стабильность K_1 и K_2 и минимум вносимых нелинейных искажений, если в качестве усилителей использованы повторители.

Рассмотрим вопрос чувствительности ТТ-РС моста с разделенными цепями к разбросу параметров пассивных элементов.

Разброс $R_1, R_2, R_3, C_1, C_2, C_3$ приводит к появлению разброса величин постоянных времени τ_1, τ_2, τ_3 . С учетом этого разброса (3) запишется в виде

$$\dot{T} + \delta_T = \frac{K_1 [1 + j\omega(\tau_2 + \delta_2)] + K_2 \omega^2 (\tau_2 + \delta_2)(\tau_3 + \delta_3) [1 + j\omega(\tau_1 + \delta_1)]}{[1 + j\omega(\tau_1 + \delta_1)][1 + j\omega(\tau_2 + \delta_2)][1 + j\omega(\tau_3 + \delta_3)]} \quad (13)$$

Из (13) следует, что нуль коэффициента передачи моста на частоте настройки имеет место при одновременном выполнении условий

$$\tau_1 = \tau_2 \text{ и } \delta_1 = \delta_2. \quad (14)$$

Возможный сдвиг частоты настройки относительно ω_0 , определенной по (6) или (9) без учета разброса, может быть всегда скомпенсирован незначительным изменением τ_3 .

Следует отметить:

а) включение в схему ТТ-RC моста усилителей позволяет осуществлять независимую подстройку постоянных времени всех цепей, а следовательно, и настройку ТТ-RC моста с разделенными цепями в целом, даже если для построения моста использованы элементы с большими допусками;

б) для получения нуля коэффициента передачи на частоте настройки достаточно выполнение условий (14), что позволяет эффективно использовать параметрическую стабилизацию характеристик ТТ-RC моста с разделенными цепями.

Проведенный анализ и экспериментальная проверка результатов показали перспективность применения ТТ-RC моста с разделенными цепями, несмотря на некоторую сложность схемы, и его явные преимущества перед ТТ-RC мостом с двумя входами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. А. Андреев, В. О. Кобак. Двойные Т-образные мосты в избирательных усилителях. Л., «Судпромгиз», 1962.
2. Д. Рой. Нулевые цепи с двумя входами. ТИИЭР, 1967, т. 55, № 2 (русский перевод).
3. Гангули. Нулевые цепи с двумя входами. ТИИЭР, 1966, т. 54, № 3 (русский перевод).
4. Свами. Нулевая цепь с двумя входами. ТИИЭР, 1966, т. 54, № 8 (русский перевод).
5. Frequency responsive Network. Патент США, № 3296463.
6. Frequency responsive Network. Патент США, № 3296464.